

Corrientes de fondo debidas al calentamiento diferencial en un lago pequeño

ELENA ROGET (*)
JORDI COLOMER (*)
JOSEP PARAROLS (*)

RESUMEN. En este trabajo se presentan los resultados más significativos de un estudio de las corrientes baroclinicas en el fondo de un lago pequeño. Algunas de las características intrínsecas del Lago Banyoles refuerzan esta fenomenología y ayudan en la recopilación de datos. Se discute acerca de la dinámica de estas corrientes y su influencia sobre la circulación de las aguas de todo el lago. Esta circulación se ve influida por la morfometría del fondo y diversos procesos térmicos, y además, parece que la rotación de la tierra la influencia ligeramente.

ABSTRACT. *This paper is a study of the baroclinic currents at the bottom of a small lake. Some intrinsic characteristics of Lake Banyoles intensify this phenomenology and help in the recording of data. The dynamics of these currents and their influence on the circulation all around the lake is discussed. The circulation pattern is bound to be influenced by morphometry of the bed and some thermal processes, and also, is seems to be slightly influenced by the Earth's rotation.*

INTRODUCCION

Las corrientes en el fondo de lagos pequeños y medianos a menudo se han relacionado sólo con el viento, bien sea directamente, o indirectamente a través de procesos como afloramientos y secas internas (Lemmin et al., 1987). Sin embargo, la circulación baroclinica debida al calentamiento diferencial entre distintas partes del lago puede llegar a ser el principal mecanismo de transporte de masa (Imberger et al., 1982). Los umbrales de detección elevados, típicos de los instrumentos oceanográficos estándar, parece ser la causa de esta omisión.

En este artículo se presenta un estudio de las corrientes baroclinicas en el fondo de un lago pequeño. Algunas características intrínsecas del Lago de Banyoles intensifican esta fenomenología y facilitan el registro de dichas corrientes. Además se discute la dinámica de estas corrientes y su influencia sobre la circulación global en el lago. La influencia que tienen sobre las corrientes baroclinicas la rotación de la tierra y la morfometría del fondo del lago también ha sido evaluada.

El lago de Banyoles se halla en Catalunya (42°7'N, 2°47'E). Tiene una área superficial de 111,79 Hm² y un volumen de 16,12 Hm³ (Moreno y García-Berthou, 1989). Su origen es cársico y el agua entra en el lago

por diversas zonas de su fondo, las cuales tienen forma de cono invertido, debido al colapso del fondo del lago. A pesar de que el lago tiene múltiples cubetas, éstas pueden agruparse en dos lóbulos principales, que llamaremos lóbulos norte y sur (figura 1).

Debido a la significativamente diferente profundidad media de los dos lóbulos, en invierno el lóbulo norte está ligeramente más frío que el sur (hasta 0'6°). El efecto de la morfometría viene reforzado por el flujo de calor a través de las cubetas surgentes, el cual es superior (un 90 % del total) en el lóbulo sur que en el norte. En invierno esta diferencia (equivalente a unos 26 W/m² de área superficial) es mayor porque el aporte neto de calor a través de dichas cubetas también es mayor (unos 30 W/m²) (Casamitjana et al., 1988). Naturalmente cabe considerar que la relación entre los volúmenes del lóbulo sur y norte es, aproximadamente, de 3 a 1, pero incluso así, por unidad de volumen, el calor procedente de estas surgencias subterráneas que llega al lóbulo sur es más del triple que en el norte. Para el primero esto representa —sin considerar otros procesos— un aumento de unos 0,3°C en diez días.

Además, aunque en el lóbulo norte haya aportes de agua, todos los desagües están en el sur. En noviembre de 1988, por ejemplo, el flujo subterráneo que entraba en el lóbulo norte era de unos 30 ± 10 l/s y el de los arroyos superficiales de 100 ± 10 l/s. Esto es, un flujo entrante de 130 ± 20 l/s (Roget, 1987). Este caudal, que representa un 15 % del total entrante en todo el

(*) Instituto de Ecología Acuática y Departamento de Física, Universidad de Girona.

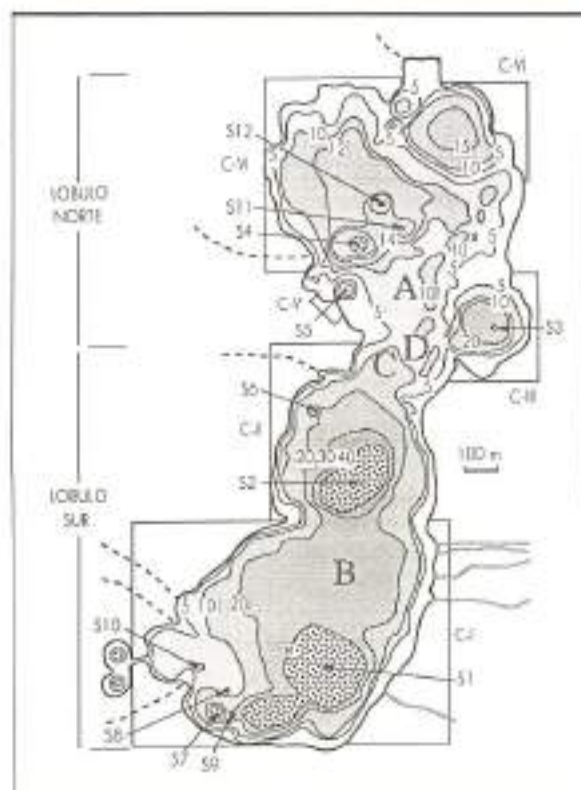


FIGURA 1. Mapa batimétrico de lago de Banyoles según MORENO-AMICH y GARCIA-BERTHOUL (1989). El lago está formado por 6 cubetas (C-I-C-VI), agrupadas en dos lóbulos, y 12 surgencias (S1-S12) que corresponden a las zonas punteadas. Las medidas experimentales fueron tomadas en los puntos de muestreo A, B, C y D.

lago, puede favorecer —aunque poco— el desarrollo de las corrientes baroclinicas (del lóbulo norte —más frío y menos profundo— al sur) las cuales se originan principalmente debido al diferente estado térmico y a la diferente profundidad entre los dos lóbulos.

EQUIPO EXPERIMENTAL

Los datos presentados en este artículo han sido registrados, principalmente, con instrumentos de la casa Aanderaa. Más concretamente, hemos utilizado una cadena de termistores y otra cadena de sensores de conductividad y temperatura, con un intervalo de medida de 20 minutos. Los sensores de temperatura tienen una sensibilidad de $0,08^{\circ}\text{C}$ y una imprecisión de $0,05^{\circ}\text{C}$. El correntímetro utilizado para la medida de las corrientes tenía un sensor de temperatura de las mismas características que los anteriores. El correntímetro es sensible a partir de $1,4\text{ cm/s}$ y su sensibilidad es de $0,1\text{ cm/s}$ para la velocidad, y 5° para la dirección. También se han utilizado sondas Crison I WTW para medidas directas de temperaturas. Su sensibilidad es de $0,1^{\circ}\text{C}$ y fueron calibradas conjuntamente. Durante todo este período se tomaron datos meteorológicos, cada 20 minutos. Para ello se utilizó una estación Aanderaa estándar con 11 sensores, situada a 100 metros del borde este del lago, a 12 metros de altura.

En este artículo nos referimos con las letras A, B, C y D a los diferentes puntos donde se recogieron los datos presentados. La localización de dichas referencias se indica en el mapa de la figura 1.

RESULTADOS

En la figura 2 se presenta la temperatura a 13 y a 19 metros de profundidad en el lóbulo sur (punto B) duran-

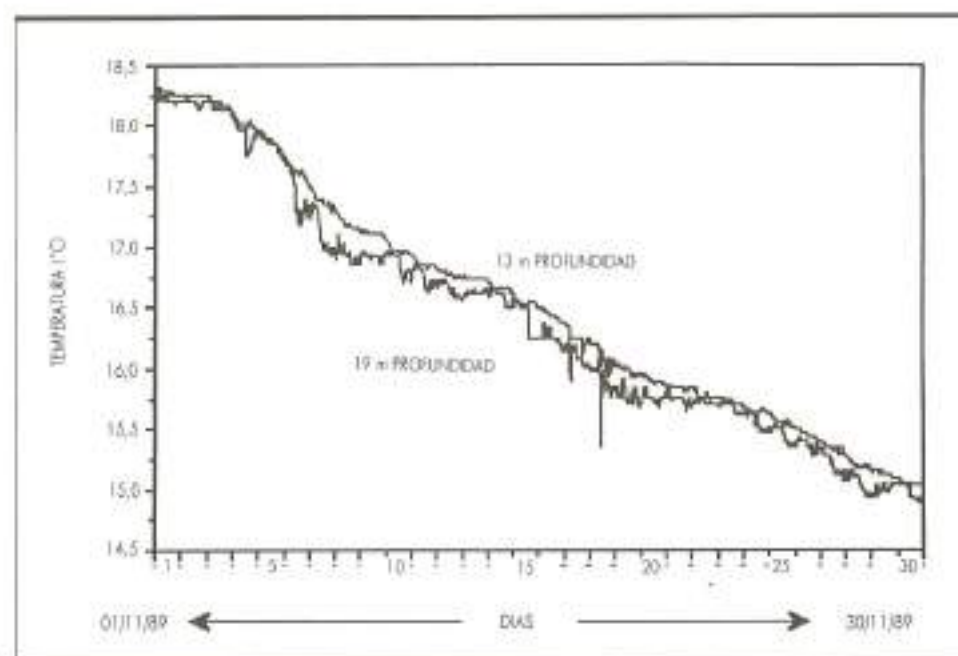


FIGURA 2. Evolución de la temperatura del agua a 13 m y 19 m de profundidad en el punto B.

te el noviembre de 1989. Durante los tres primeros días, ambas temperaturas son prácticamente iguales. Sin embargo, más tarde, a 19 metros de profundidad —uno por encima del fondo— aparece agua más fría. Las variaciones de la temperatura visibles a esta profundidad son prácticamente imperceptibles a 5 metros. Esto indica la advección horizontal de agua más fría, por encima del fondo. Desde finales de otoño hasta mediados de primavera se ha registrado una fenomenología análoga.

La evolución de la temperatura a 5 metros de profundidad en el punto A y a 19 metros —uno por encima del fondo— en B se representan en la figura 3 (a pesar que la temperatura a 5 metros se tomó en la parte norte del lago, la estructura de las variaciones térmicas globales es análoga en todo el lago). En la figura se puede ver que las dos series representadas presentan las mismas variaciones pero con un desfase temporal. Esto indica que el agua que se encuentra inmediatamente por encima del fondo puede proceder de una zona más fría y más superficial donde las variaciones térmicas correspondientes al día-noche sean más evidentes. Entonces, debido a su mayor densidad esta agua se hunde formando la corriente baroclínica de fondo. Las dos intrusiones aún más frías observadas a 19 metros de profundidad se registraron durante varias horas —aunque la escala de la figura no permita apreciarlo— y proceden de la cubeta CII (figura 1). Durante esta época del año en la cubeta CII hay, debajo de una muy localizada termocli-

na a 20 metros de profundidad, agua más fría que en el resto del lago (Casamitjana et al., 1990). Durante los días en que se registraron estas intrusiones la precipitación fue elevada (143 l/m^2) y hubo vientos fuertes de hasta 11 m/s .

La velocidad —módulo y dirección— y la temperatura de la corriente registradas en el punto D a 9 metros —uno por encima del fondo— se presentan en la figura 4. También se ha representado la diferencia entre la temperatura medida en D a 9 metros y a 13 metros en B, así como las componentes norte y sur del viento.

En la figura 5 se presenta la temperatura diaria media a 5, 8, 10, 15 y 16 metros de profundidad en el punto C —con una profundidad total de 17 m— desde diciembre hasta febrero de 1990. En ella se observa que en el fondo hay una capa de agua ligeramente más fría. En esta capa también se observan las variaciones de temperatura típicas del día-noche tal como se ve en la figura 6 donde se ha representado la temperatura a 3, 10 y 16 metros durante tres días del mes de diciembre. Las variaciones de temperatura son acusadas a 3 y 16 metros de profundidad pero no a 10 m. Los mismos resultados se obtuvieron en dos puntos distintos separados unos 80 metros entre ellos y que estaban en la sección transversal que contiene a C. (Con los datos registrados con la cadena en estas dos localizaciones distintas se ha elaborado la figura 5.)

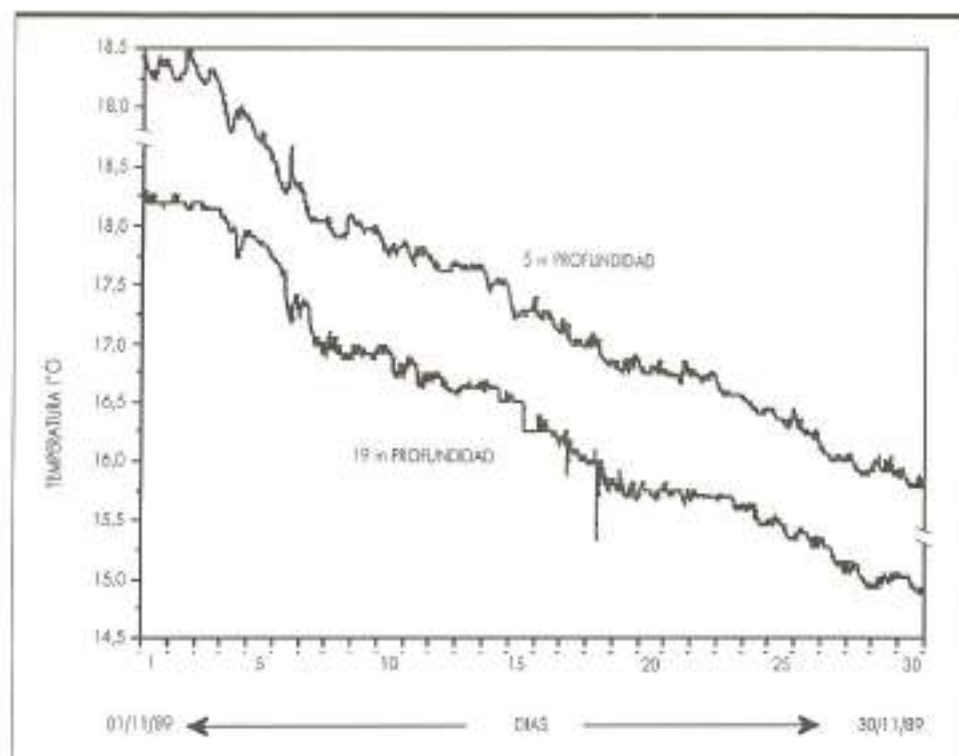


FIGURA 3. Evolución de la temperatura del agua a 5 m de profundidad en el lóbulo norte y a 19 m en el lóbulo sur. Ambas series térmicas presentan la misma variación pero desfasadas en el tiempo.

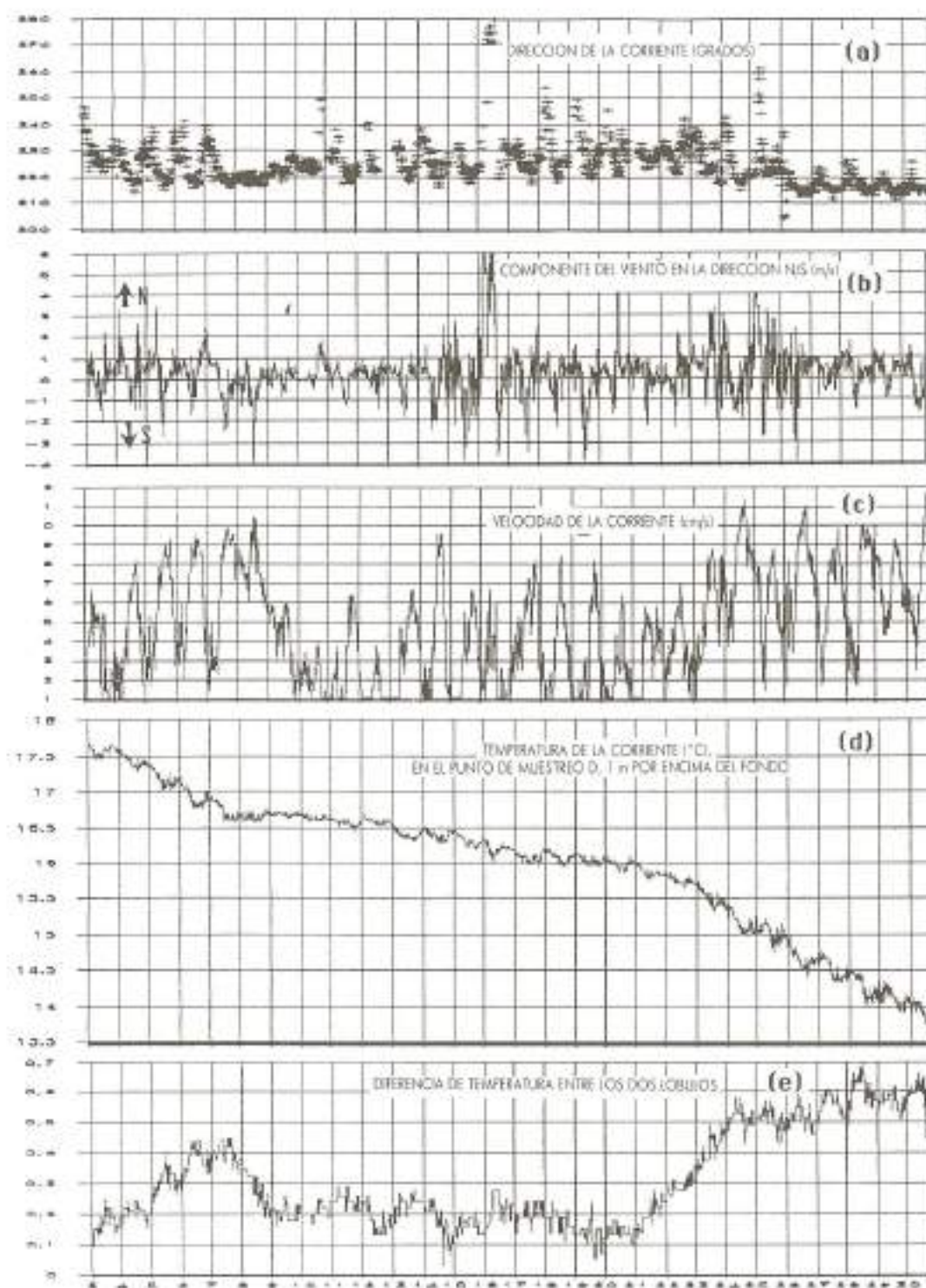


FIGURA 4. (a) Dirección de la corriente (grados), (b) Velocidad de la corriente (cm/s) y (d) Temperatura de la corriente (°C), en el punto de muestreo D, 1 m por encima del fondo. (b) Componente del viento en la dirección N/S (m/s) y (e) Diferencia de temperatura entre los dos lóbulos.

FIGURA 5. Temperatura media diaria a 5, 8, 10, 15 y 16 metros de profundidad en una zona entre las dos lábuls con una profundidad total de 17 metros. Durante todo el período el agua a 15 y 16 m es ligeramente inferior que la del resto de la columna.

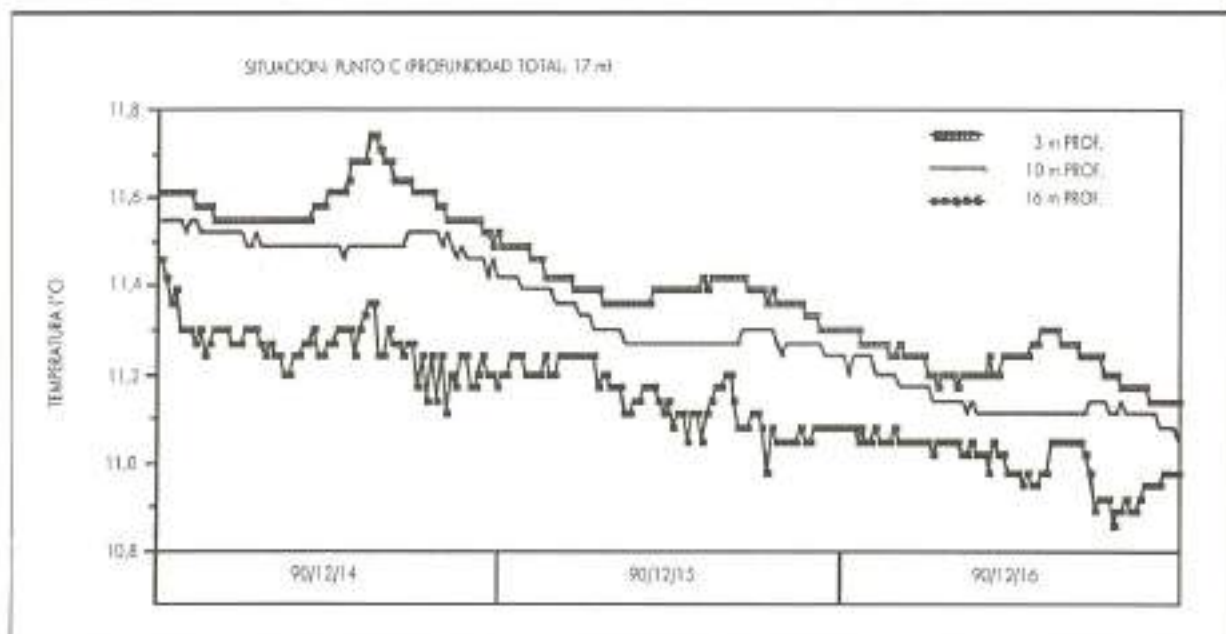
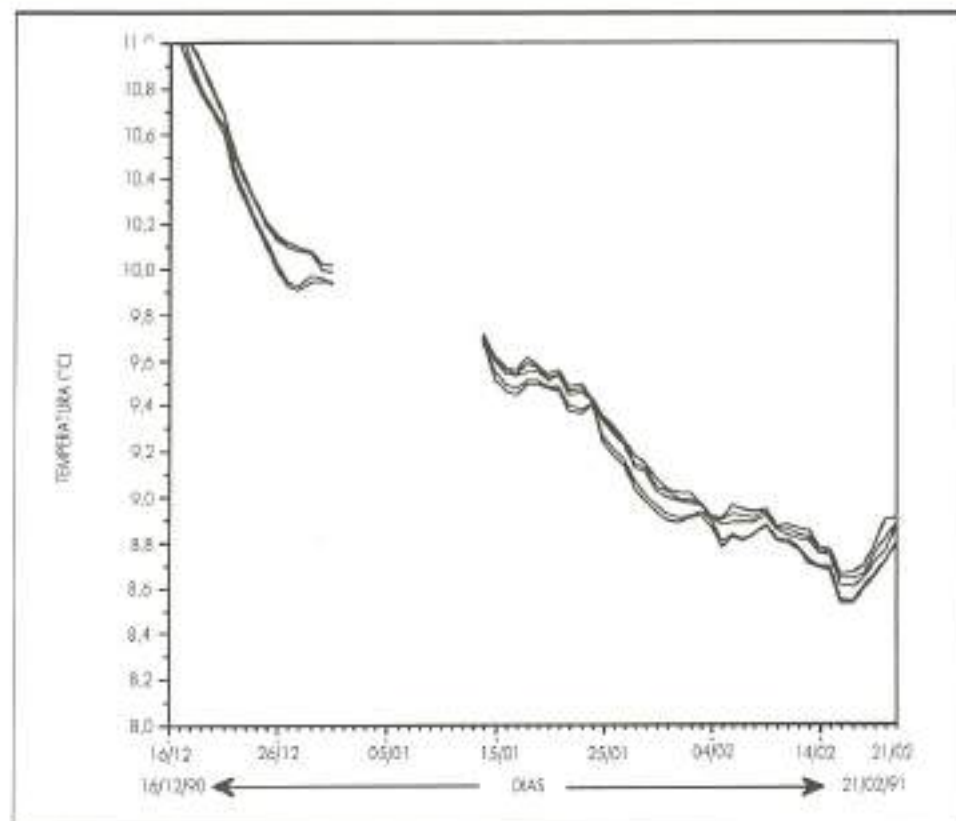


FIGURA 6. Evolución de la temperatura del agua a 3, 10 y 16 m para tres días típicos, en el punto C.

DISCUSION

De la figura 4 (b) y (c) se observa que el habitual episodio diario de elevada velocidad de la corriente coincide con viento que sopla con una cierta componente sur, esto es de sur a norte. Sin embargo, aunque con menos intensidad, dichas corrientes continúan cuando sopla viento del norte. Esto indica que a pesar de que el viento influya claramente en ellas, hay otros factores que intervienen y que en definitiva son su causa. Si observamos en 4 (f) la diferencia de temperatura —representativa del estado térmico diferencial entre los dos lóbulos— vemos que cuanto mayor es dicha diferencia la media de la velocidad de las corrientes es más intensa, aunque no varíe de forma lineal. En la figura 7 se representa, conjuntamente con la velocidad de la corriente, una estimación de la velocidad baroclínica obtenida a partir de $(\alpha \Delta T g h)^{1/2}$ donde $\alpha = 2,57 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ es el coeficiente de expansión térmica, ΔT la diferencia de temperatura entre los dos lóbulos, g la aceleración de la gravedad y h la distancia característica en la dirección vertical de procedencia del agua de la corriente baroclínica, que para el punto D hemos tomado de 4 m. En la figura se ve cómo la corriente baroclínica calculada sigue claramente la tendencia de la corriente registrada, aunque no explica las fuertes variaciones observadas.

Estas variaciones parecen explicarse a partir del régimen de viento. Así un viento del sur desplaza el agua del lóbulo sur hacia el lóbulo norte, el cual experimenta

un aumento de presión que producirá una corriente hacia el sur, y que en este caso reforzará a la corriente baroclínica ya existente (figura 8a). De otra parte un viento del norte crea una circulación superficial de norte a sur, pero esto a su vez implica una corriente de retorno —de sur a norte— en el fondo, y por lo tanto contrarrestará la corriente baroclínica (figura 8b). Así pues, volviendo a la figura 4, el día 8 en que casi no sopló viento del norte la corriente de fondo siguió durante todo el día y sus máximos de intensidad coincidieron con los máximos en la velocidad del viento. En cambio en los otros días, cuando sí aparece el viento del norte, la corriente —aunque con inercia— irá disminuyendo. En días de viento fuerte del norte (por ejemplo 15 y 16) o de poca diferencia térmica entre los dos lóbulos (por ejemplo 11 y 12), la corriente disminuirá hasta velocidades inferiores a la sensibilidad del correntímetro, pero en las circunstancias opuestas —viento del norte suave y mayor diferencia térmica— las velocidades mínimas diarias son perfectamente observables con nuestro equipo (por ejemplo días 28 y 29).

La dirección de la corriente también indica que la contracorriente sur-norte, inducida por el viento del norte en las capas inferiores del lago, interfiere con la corriente baroclínica, ya que cuando se da esta circunstancia la dirección de la corriente de fondo medida en el punto D se desvía ligeramente hacia el norte, dependiendo de la intensidad del viento (por ejemplo días 16 y 25).

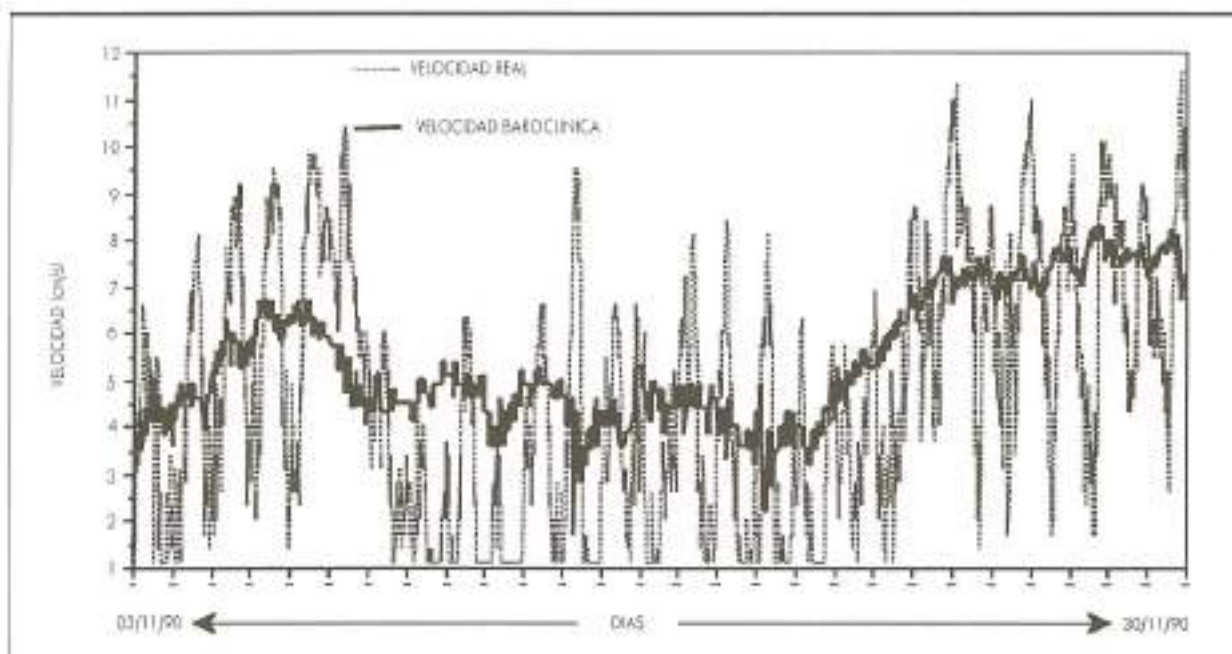


FIGURA 7. La velocidad baroclínica teórica obtenida a partir de la relación $(\alpha \Delta T g h)^{1/2}$ donde α es el coeficiente de expansión térmica, ΔT es la diferencia de temperatura entre los dos lóbulos, g la aceleración de la gravedad y h la distancia, en la dirección vertical, de procedencia del agua, reproduce la tendencia global observada en la velocidad real de la corriente baroclínica, medida en una sección transversal entre los dos lóbulos, a 1 metro por encima del fondo.

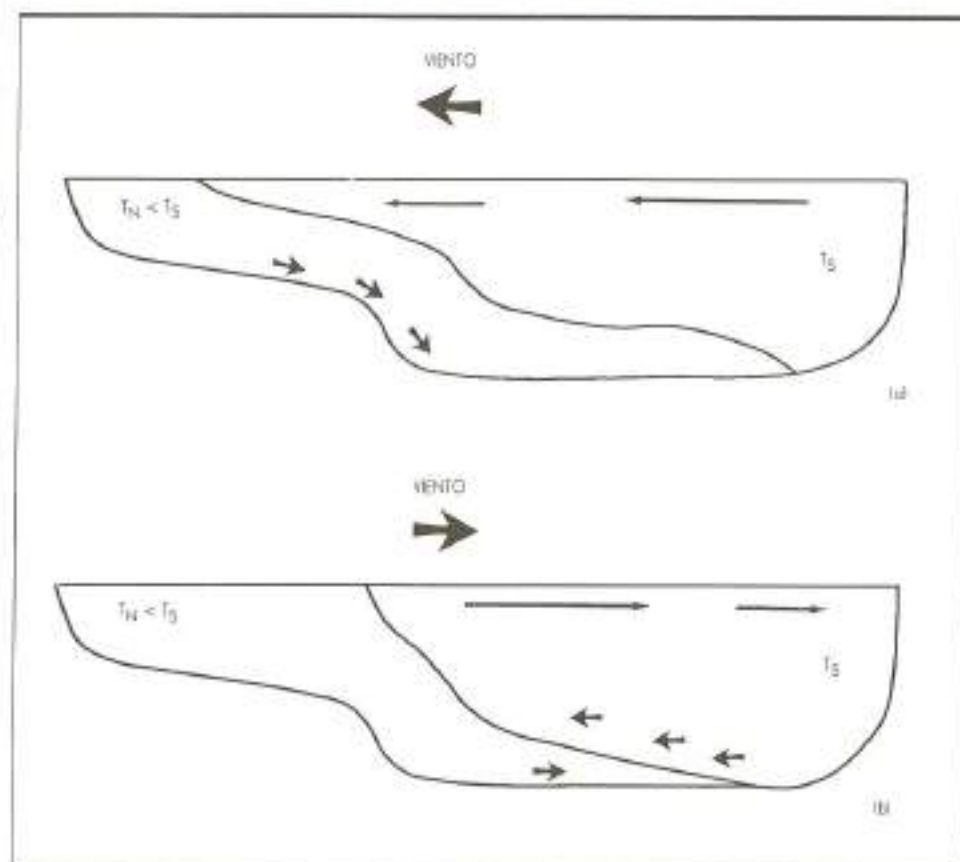


FIGURA 8. Representación esquemática del efecto del viento —dependiendo de su dirección— sobre las corrientes baroclínicas de fondo, en el caso del lago de Banyoles donde el lóbulo norte, masas profundo, también es el que tiene una temperatura inferior T_N .

La dirección de la corriente no llega a ser nunca de 180° debido a un efecto de la morfometría del fondo, ya que entre los puntos *D* y *C* el fondo presenta una desviación de unos 20° respecto a la dirección sur.

Sin embargo la desviación mínima respecto a la dirección parece variar ligeramente —aun en condiciones circunstanciales análogas— con la velocidad de la corriente (comparar, por ejemplo, los días 13 y 18). Así, considerando las velocidades registradas en *D* y tomando como longitud característica un kilómetro —la longitud del lóbulo norte, esto es la mitad del eje longitudinal de todo el lago— el número de Rossby (Pedlosky, 1987) toma valores entre 0,1 y 1. Debido a que la sección transversal que contiene *C* es la menor del lago, la velocidad medida aquí es mayor que en otras secciones y como en el número de Rossby la velocidad aparece en el numerador, los valores obtenidos son un límite superior. Por tanto, la escala de tiempo de la corriente de fondo excede el período de rotación, y por tanto, la aceleración de Coriolis se hace importante.

Por otra parte, si suponemos que no hay otras fuerzas actuando, la fuerza de desviación debe ser compensada por la fuerza centrífuga de manera que $e^2/r = 2\Omega v \sin \Psi$, donde v es la velocidad de la corriente, Ω la velocidad angular de la tierra, Ψ la latitud de

Banyoles y r el radio de curvatura de la corriente. Por consiguiente, si la velocidad de la corriente es de 1 cm/s, el radio de la órbita será de unos 100 metros, y de 1.000 metros si la velocidad es de 10 cm/s. Estos resultados indican que las dimensiones del lago permiten la desviación de la corriente de fondo.

La fuerza relativa de la inercia respecto al rozamiento con el fondo también se ha evaluado a partir de un número adimensional. Este número es análogo al número de Ekman pero en vez de considerar la aceleración debida al rozamiento interno, se ha tomado la aceleración de la corriente debida al rozamiento con el fondo. De lo anterior se deduce el número $E_b = v C_b / h f$, donde f es el parámetro de Coriolis ($f = 2\Omega \sin \Psi$), h el grueso de la corriente y C_b el coeficiente de rozamiento en el fondo, el cual hemos tomado como $2 \cdot 10^{-2}$ (Laska, 1981). Los valores obtenidos con los datos registrados en *C* están entre 0,1 y 1. Una vez más, estos valores son un límite superior por que la velocidad de la corriente en *C* debe ser mayor que en las otras secciones transversales, todas ellas menores. Por tanto, a pesar del rozamiento, la desviación es posible.

Estos resultados indican que al menos cabe plantearse si la trayectoria de la corriente puede ser modificada por la fuerza de Coriolis. Desviaciones de la trayectoria

del río Thomson entrando en el Lago Kamloops debido a la fuerza de Coriolis son descritas por Hamblin et al., 1978. En aquel caso la corriente alcanza después de un centenar de metros la ribera derecha y luego fluye constreñida a un movimiento paralelo a la costa, como pudiera suceder en Banyoles.

Si, en la capa fría y en el punto D, consideramos una velocidad media característica de 2 cm/s y una área transversal de dicha corriente de unos 200 m², se deduce un flujo del orden de 1.000 l/s, lo cual implica un flujo igual en dirección contraria. El flujo total entrante en el lago, bien sea a través de las surgencias subterráneas o a través de los arroyos superficiales, es de un orden inferior. Esto implica que esta corriente de fondo debe influir en la circulación general del lago.

CONCLUSIONES

En el lago de Banyoles se ha hallado una corriente baroclínica de fondo —debida al calentamiento diferencial del lago— en la dirección norte-sur desde el final de otoño hasta mediados de primavera. La influencia que ejerce el viento sobre ésta, es a veces de refuerzo y otras de contrarresto, dependiendo de su dirección.

La corriente alcanza, en alguna sección transversal, velocidades de 10 cm/s y se ha estimado un flujo total del orden de 1.000 l/s, un orden más que el flujo entrante total del lago. Se observan variaciones en la dirección de la corriente respecto la norte-sur causadas por la morfometría, el viento y, posiblemente, por la fuerza de Coriolis.

Estos resultados sugieren que las corrientes baroclínicas de fondo debieran tomarse en consideración en modelos de gestión de lagos, ya que el intercambio másico entre cubetas forzado por dichas corrientes tiende a reducir las diferencias entre ellas. Además tanto la re-

mineralización como el transporte vertical están relacionados con el movimiento horizontal en la capa inferior del lago y ambos fenómenos juegan un papel decisivo en el desarrollo del estado trófico de un lago.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado parcialmente con una beca de la Generalitat de Catalunya (CIRIT-AR89).

REFERENCIAS

- CASAMITJANA, X.; ROGET, E.; JOU, D., y LLEBOT, J. E. (1988). Effect of suspended sediment on the heating of lake Banyoles. *Journal of Geophysical Research*, 15 agosto, vol. 93, núm. C8, págs. 9332-9336.
- CASAMITJANA, X., y ROGET, E. (1990). The thermal structure of Banyoles. septiembre, núm. 24, 88-91. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*
- HAMBLIN, P. F., y CARMACK, E. C. (1978). River-Induced Currents in a Fjord Lake. *Journal of Geophysical Research*, 20 febrero, vol. 83, núm. C2, págs. 885-899.
- IMBERGER, J., y HAMBLIN, P. F. (1982). Dynamics of lakes, reservoirs and cooling ponds. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 14: 153-187.
- LASKA, M. (1981). Characteristics and modelling of physical limnology processes, núm. 54. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich*
- LEMMJN, U., y IMBODEN, D. M. (1987). Dynamics of bottom currents in a small lake. *Limnol. Oceanogr.*, 32(1), 62-75.
- MORENO-AMICH, R., y GARCIA-BERTHOUE, E. (1989). A new bathymetric map based on echo-sounding and morphometrical characterization of the Lake of Banyoles (NE-Spain). *hidrobiología* 185:83-90.
- PEDLOSKY, J. (1987). *Geophysical fluid dynamics*. Spring Verlag.
- ROGET, E. (1987). Quantification of the incoming underground flows in the basins of lake Banyoles (en catalán). *Universitat Autònoma de Barcelona*.